

VITRIFICACIÓN SOLAR DE LODOS DE FLOTACIÓN DE LA ZONA MINERA DE SIERRA ALMAGRERA (ALMERÍA)

Andrés Navarro

Universidad Politécnica de Cataluña

(UPC) ETSEIAT

Departamento de Mecánica de Fluidos

Inmaculada Cañadas

Diego Martínez

José Rodríguez

CIEMAT

Plataforma Solar de Almería (PSA)

Summary

Text

Resumen

La minería del Pb-Ag en el área de Sierra Almagrera (Almería) ha generado importantes cantidades de lodos de flotación, originados en la concentración de los sulfuros. Todo ello ha producido una importante contaminación por metales (Ag, As, Ba, Cu, Pb, Sb y Zn) en los suelos de la zona del Arteal (Cuevas del Almanzora) y Jaravías y en los sedimentos de la rambla de Canalejas (afluente del río Almanzora). Para evaluar la posible remediación de las zonas mineras afectadas se han realizado ensayos de vitrificación de los lodos mediante un horno solar y se ha estudiado la capacidad de lixiviación de los residuos mineros, una vez vitrificados.

Así, en el caso del residuo del Arteal, los lixiviados obtenidos indican que disminuye claramente la movilidad del Ba, Cu, Fe y Ni, incrementándose la del Pb y Sb, mientras que Cd y Mn presentan concentraciones parecidas en los lixiviados de las muestras tratadas y sin tratar. Por el contrario, en el caso del residuo minero de Jaravías, con un tratamiento térmico a mayor temperatura, la movilidad de los principales contaminantes se reduce sensiblemente (Fe, Mn, Pb y Zn), salvo en el caso del As y Ba.

Palabras clave: vitrificación, horno solar, residuo minero, metales.

INTRODUCCIÓN

La vitrificación consiste en la transformación de una matriz sólida en un producto “no cristalino” o amorfo, mediante el incremento de la temperatura. El producto es un material de carácter vítreo que se caracteriza por una alta estabilidad química y mecánica, y una baja capacidad de lixiviación (USEPA, 1992). De hecho, la vitrificación es un método de estabilización/solidificación que usa una fuente de energía convencional para fundir suelos o residuos a temperaturas que en algunos casos alcanzan los 2.000 °C (USEPA, 1988; Sellers, 1998; LaGrega, 2001; Ojovan et ál., 2001; Khan et ál., 2004; Bhandari et ál., 2007). En general, se trabaja a temperaturas próximas a los 1.200-1.300 °C, produciéndose un “vidrio” relativamente inerte, en cuya estructura los metales pueden quedar incorporados. También pueden separarse de la matriz vítrea a causa de la volatilización o de la precipitación diferencial (Çoruh et ál., 2006). En cualquier caso, se trata de una tecnología cuyo objetivo fundamental es reducir la posible lixiviación de las sustancias tóxicas presentes en un residuo o un suelo contaminado.

Los principales mecanismos de estabilización del material vitrificado son los siguientes (USEPA, 1992):

- Formación de enlaces químicos:
 - Covalente con los átomos de O (incorporación a la estructura sólida).
 - Iónico (alteración de la estructura).
- Encapsulación de los contaminantes por capas de material vítreo en el proceso de fusión, lo que puede conducir a una protección eficaz ante la posible movilización de los contaminantes a causa de cualquier mecanismo de alteración.

En relación con las experiencias de vitrificación de residuos mineros, cabe destacar la vitrificación de residuos procedentes de la flotación de menas de Cu (Çoruh et ál., 2006), demostrándose que el tratamiento térmico por encima de 1.200 °C reducía las concentraciones de Cu, Zn y Pb hasta 2,5, 2 y 2,8 mg/l, respectivamente. Además, la adición de SiO₂ y CaCO₃ incrementó la estabilidad del material vitrificado y redujo las concentraciones de los metales en los lixiviados obtenidos. Por el contrario, la adición de Na₂CO₃ contribuyó a la movilización de los contaminantes. Por otro lado, la vitrificación de residuos mineros ricos

en Fe mediante horno eléctrico, procedentes de la metalurgia del Cu, a una temperatura de 1.400 °C, demostró una notable disminución de la lixiviación de Zn, Cu y Pb, pasando de 114,4, 94,9 y 7,2 mg/l respectivamente en el residuo sin tratar, a 0,17, 0,008 y < 0,001 mg/l respectivamente, en uno de los vitrificados obtenidos (Karamanov et ál., 2007).

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de lixiviación de dos residuos mineros vitrificados, procedentes de la flotación de menas de Pb-Ag, mediante el empleo de un horno solar como medio de vitrificación. Con ello se pretende analizar la posibilidad de emplear una fuente de energía renovable en el tratamiento térmico de residuos, cuya aplicación sería novedosa y, posiblemente, con un coste económico inferior al que implica la utilización de tecnologías convencionales.

MARCO GEOLÓGICO

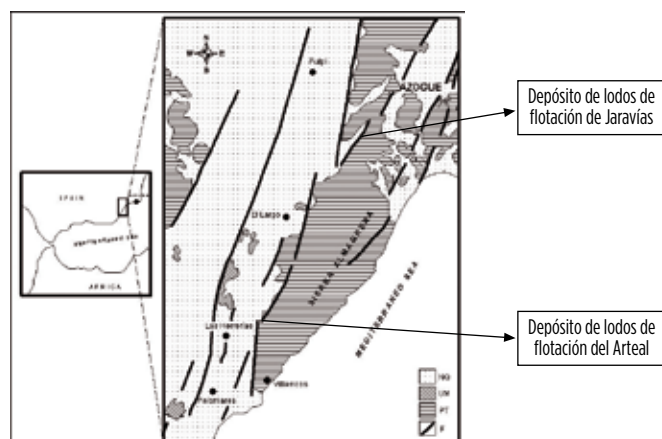
Geología regional

La actividad minera en esta región, situada al NE de la provincia de Almería (figura 1), se ha centrado en la explotación de mineralizaciones hidrotermales de carácter filoniano en Sierra Almagrera y estratoligadas en las Herrerías y Jaravías, habiéndose desarrollado durante distintos periodos históricos y encontrándose entre las más antiguas de la Península Ibérica (Navarro et ál., 1994).

La primera zona objeto de este estudio, depósito de lodos del Arteal en Sierra Almagrera, se encuentra situada en el sector oriental del valle bajo del río Almanzora, cerca de uno de sus afluentes: la rambla de Canalejas, y limita al E con Sierra Almagrera (figura 1). Dicha Sierra es básicamente un conjunto de filitas grafitosas, filitas cuarcíticas y metavulcanitas de composición ácida, asimilables a la unidad Nevado-Filábride del Lomo de Bas. Estos materiales se extienden en un gran arco geotectónico que va desde el Norte de Águilas hasta Sierra Almagrera, prolongándose por Sierra Cabrera y Sierra Alhamilla, en una posición similar al manto del Veleta. Por encima de los niveles filíticos aparecen filitas coloreadas, cuarcitas y una formación carbonatada, de carácter alpujárride. La estructura actual de los materia-

SE PRETENDE ANALIZAR LA POSIBILIDAD DE EMPLEAR UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS.

Figura1 mapa de situación de la zona de estudio



les parece controlada por una serie de fracturas posteriores a la disposición de los mantos, y que en este sector son un sistema de fracturas paralelo al sistema de Alborán, y al desgarre senestro de Terrenos de dirección N15-E, paralelo a la falla de Palomares. El vulcanismo neógeno aflora en Sierra Almagrera (Cala Panizo, Pozo del Esparto) y en áreas cercanas (isla de Terreros), así como en varias zonas de la cuenca de Vera y depresión de Pulpí (Cerro Colorado, Alifraga, Guazamara, etc.).

La segunda zona de estudio, depósito de lodos de Jaravías (figura 1), se sitúa al norte de Sierra Almagrera, en una zona elevada próxima a la cubeta de Terreros, en la Sierra del Aguilón, ocupando la zona minera explotada un corredor de unos 3 km de longitud en dirección SW-NE. Los materiales encajantes de las mineralizaciones explotadas son los mármoles de la unidad

Figura 2
“tailings” (izquierda) y escombreras (derecha arriba) de Sierra Almagrera en El Arteal



Figura 3
fases secundarias en Sierra Almagrera (Almería)



Figura 4
detalle de “hardpans” (capas o costras estratificadas) en los “tailings” de Jaravías, junto a Sierra Almagrera



Nevado-Filábride, aunque también se explotaron depósitos filonianos encajados en las filitas y esquistos.

Mineralizaciones y residuos mineros

En el caso de Sierra Almagrera nos encontramos con un conjunto de yacimientos filonianos de carácter epitermal, y posiblemente de sulfuración intermedia (Camprubí y Albinson, 2007), caracterizados por la existencia de cuerpos mineralizados ciegos y que no afloran en superficie y constituidos, mayoritariamente, por galena, esfalerita, sulfosales de Pb, calcopirita, pirita y con barita y siderita como minerales dominantes en la ganga. Así, en Sierra Almagrera se explotaron filones de carácter hidrotermal (Martínez Frías, 1991; Navarro et ál., 1994; 2004; 2008a, b), en la época más reciente, durante el periodo 1838-1957, procediéndose únicamente al lavado de escombreras desde 1969 hasta 1991. La minería subterránea se llevó a cabo con mayor intensidad durante el siglo XIX, explotándose hasta 45 grandes filones de 0,15-7 m de anchura media y con corridas de hasta 0,8 km, habiéndose alcanzado profundidades de casi 500 m, sobre todo cuando a principios del siglo XX se construye un sistema de desagüe que permite drenar el campo filoniano hasta los 180 m bajo el nivel del mar. La producción de Pb de este sector superó, posiblemente, las 500.000 t de Pb-metal, llegando a las 2.000 t de Ag.

Los fangos de flotación existentes en la zona de El Arteal en Sierra Almagrera (**figura 2**), estimados en 3,5 Mt, se han originado como resultado de las labores mineras más recientes, centradas en la explotación de las antiguas escombreras. Sobre el terreno aparecen dispuestos en forma de grandes terrazas escalonadas, desprovistas de vegetación y continuamente sometidas a la acción del viento y de la escorrentía superficial. La formación de fases secundarias como consecuencia de los procesos de neutralización y/o hidrólisis constituye el principal mecanismo de atenuación de los productos de oxidación generados por los sulfuros pre-

LA HISTÓRICA ACTIVIDAD MINERA DE AMBAS ZONAS HA PRODUCIDO UNA IMPORTANTE CONTAMINACIÓN POR METALES.

sentes en los depósitos de lodos y escombreras. En climas semiáridos, como el de esta zona, las fases secundarias que aparecen son el resultado de una concentración elevada (saturación) de los productos de oxidación y de la neutralización ácida (**figura 3**), provocando la movilización de los contaminantes por disolución de dichas fases, en periodos húmedos y afectando a los suelos y aguas subterráneas (Navarro et ál., 2004, 2008a), lo que justifica la remediación de las áreas afectadas.

El origen de los primeros depósitos de fangos de flotación está en la creación de la empresa Minas de Almagrera, S.A. en 1945, que retomó la explotación de las minas tras la Guerra Civil, emprendiendo una serie de importantes labores entre las que destacó la construcción de una galería general de transporte (socavón Santa Bárbara) de 4.123 m de longitud, finalizada en 1951. Durante este periodo se pensó llevar la explotación hasta los 400 m bajo el nivel del mar y se construyó un lavadero de flotación con una capacidad media de 800 t/día, previéndose una producción anual de 12.000 t de concentrados. Esta actividad minera se paraliza en 1958, aunque las labores subterráneas ya se habían dado por

finalizadas en el año anterior. Posteriormente, y a partir de 1969, distintas empresas privadas reanudan el lavado de escombreras con leyes suficientes en Pb y Ag, llegando a funcionar una planta de flotación con dos líneas de concentración: sulfuro de plomo y piritas, hasta 1991, cuando finaliza la explotación de las minas de Sierra Almagrera (Navarro et ál., 1998).

En el caso de Jaravías, se trata de una mineralización hidrotermal de baja-media temperatura, y que presenta unas asociaciones elementales muy similares a las de los yacimientos epitermales del SE peninsular. La paragénesis más común parece ser siderita-pirita-galena argentífera-esfalerita-calcopirita-marcasita con baritina, celestina y yeso en la ganga. En relación con los datos históricos en la zona de Jaravías, la explotación se inició en la época romana,

LOS ENSAYOS DE VITRIFICACIÓN REALIZADOS MUESTRAN RESULTADOS BASTANTE DIFERENTES.

se retomó con mayor intensidad durante el periodo 1873-1918 (explotación de hierro, fundamentalmente), y posteriormente, desde los años 40, se beneficiaron el plomo y la plata, hasta 1970, cuando cesó tal explotación (Navarro y Martínez, 2008b). El resultado de las actividades mineras más recientes ha sido la producción de, aproximadamente, 300.000 t de fangos de flotación o “tailings” (similares a los existentes en Sierra Almagrera), vertidos sobre el terreno sin ningún control y que constituyen un importante foco de contaminación (figura 4).

Climatología e hidrología

La zona estudiada se sitúa en una región que posee un clima semiárido, en la cual existe una gran irregularidad hidrológica, con extensos periodos de estiaje, y periodos muy localizados de tiempo en los que se producen las precipitaciones. En ocasiones, llega a ser mayor el volumen de agua precipitado en unas pocas horas o en un día, que el precipitado en un mes o incluso el precipitado en un año medio.

Los valores medios de precipitación son de, aproximadamente, 285 mm/año, siendo la evapotranspiración real del orden del 85-95% de la precipitación media anual, lo que indica una escasa infiltración potencial de agua al terreno. Dicha infiltración está localizada en los periodos de tiempo asociados a precipitaciones de cierta magnitud. El principal depósito de residuos (El Arteal) se sitúa junto a la rambla de Canalejas, uno de los principales afluentes del río Almanzora en su margen izquierda, y que de manera análoga al río principal, se trata de un curso fluvial de marcado carácter estacional, y que durante buena parte del año no presenta ninguna circulación superficial en su tramo bajo. El principal acuífero de la zona de estudio es el acuífero del río Almanzora y el de la rambla de Canalejas (conectados hidráulicamente), y que están constituidos por arenas, gravas, limos y arcillas. La potencia media del acuífero del Almanzora puede estimarse en unos 35-40 m, con un espesor saturado en torno a los 7 m. El acuífero de la rambla de Canalejas, el del valle bajo y el delta del Almanzora están cerrados lateralmente por los depósitos terciarios de la depresión de Vera, excepto en el sector E, donde este cierre lo constituye el macizo metamórfico de Sierra Almagrera y desde el punto de vista hidrogeológico pueden definirse como un acuífero libre de carácter vulnerable.

Figura 5

vista del horno solar (centro) y atenuador (derecha) en las instalaciones de la PSA en Tabernas (Almería)



MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de suelos y residuos

Para caracterizar estas antiguas zonas mineras se han llevado a cabo distintas campañas de muestreo realizadas. En el caso de los residuos mineros, suelos y sedimentos, tras su cuarteado, secado y molienda, se determinaron mediante activación neutrónica (INAA) los siguientes elementos: Au, Ag, As, Ba, Br, Ca, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Hg, Ir, Mo, Na, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Th, U, W, Zn, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb y Lu. Mediante digestión ácida y posterior espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción (ICP-AES), se determinaron: Ag, Cd, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, Al, Be, Bi, Ca, K, Mg, P, Sr, Ti, V, Y y S, en Actlabs (Ontario, Canadá). También se han llevado a cabo determinaciones mediante difracción de rayos X, empleando un difractómetro Philips PW 1050 equipado con una fuente de Cu R-X y operando a 40 kv y 30 mA (Actlabs).

Horno solar

El equipo empleado (figura 5) consta esencialmente de un helióstato plano que realiza un seguimiento solar continuo, un espejo parabólico concentrador, un atenuador o persiana y la zona de ensayos situada en el foco del concentrador, donde se ubica el horno solar. El espejo captador plano (helióstato) refleja

Figura 6

vista del material en proceso de vitrificación



Tabla 1 Concentración de metales y elementos traza de los “tailings”, suelos y sedimentos del entorno de Sierra Almagrera

	Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Ba (%)	Cd (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Hg (ppm)	Fe (%)	Pb (ppm)	Se (ppm)	Sb (ppm)	Sr (%)	V (ppm)	Zn (ppm)
Tailings															
Media	—	26,6	278,4	5,8	17,6	80,6	59,0	—	12,43	2.879,3	—	169,8	0,53	91,6	2.179,2
Mín.	<5	5,0	200	3,2	5,8	52,0	21,0	<1	10,0	1.588,0	<3	66,0	0,28	84,0	1.520,0
Máx.	15,0	46,0	460	10,0	35,0	130	134,0	3,0	15,4	5.428,0	<5	270,0	1,0	104,0	3.000,0
Suelos/Sed															
Media	8,2	6,7	79,8	0,93	1,7	89,2	43,4	—	5,65	1.642,1	—	69,2	0,08	114,7	522,1
Mín.	<2	<5	18,0	0,064	0,06	51,0	27,0	<1	4,01	152,0	<3	6,5	0,03	71,0	135,0
Máx.	26,0	40,0	340	3,0	3,5	140	69,0	2,0	12,2	3.244,0	<5	330,0	0,36	147,0	2.000,0
SNC	11,0	<0,3	12,2	240	0,06	—	12	<1	3,59	12	<3	2,8	0,01	—	81
NH (*)	<5	15**	55	0,0625	12	380	190	10	—	530	100**	15	—	250**	720

ND: no determinado; SNC: suelo no contaminado; NH(*): normas holandesas, new C-values; (**): nivel indicativo de contaminación importante

Tabla 2 Mineralogía de los lodos del Arteal

MINERALES	FÓRMULA
Fases primarias	
Galena	PbS
Baritina	BaSO ₄
Cinabrio	HgS
Canfieldita	Ag ₈ SnS ₆
Gerdorsfita	NiAsS
Quarzo	SiO ₂
Smithita	(Ag, Cu) ₁₀ Sb ₂ S ₁₁
Fases secundarias (baja solubilidad)	
Goethita	FeOOH
Hercinita	FeAl ₂ O ₄
Caolinita	Al ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈
Fases secundarias (sulfatos de baja solubilidad)	
Argentojarosita	Ag ₂ Fe ₆ (SO ₄) ₄ (OH) ₁₂
Yeso	Ca(SO ₄) · 2H ₂ O
Jarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Hidroniojarosita	(H ₃ O) ₂ Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Natroalunita	NaAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Langita	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆ · 2H ₂ O
Fases secundarias (media/alta solubilidad)	
Bonatita	Cu(SO ₄) · 3H ₂ O
Goldichita	KFe(SO ₄) ₂ · 4H ₂ O
Ferrohexahidrita	FeSO ₄ · 6H ₂ O
Szomolnokita	FeSO ₄ · H ₂ O

los rayos solares paralelos y horizontales sobre el disco parabólico, el cual los vuelve a reflejar concentrándolos en su foco. La cantidad de luz incidente se regula mediante el atenuador situado entre el concentrador y el helióstato. Esta configuración puede ser modificada dependiendo del tipo de ensayo a realizar,

generándose una potencia de 70 kW, cuando el atenuador está totalmente abierto y se produce una radiación solar de 1.000 W/m². La vitrificación de los materiales se realiza en un crisol cerámico instalado sobre la mesa de ensayos, en una cámara abierta en dirección al concentrador, y cuyo giro permite un calentamiento suficientemente uniforme de las muestras, hasta alcanzar su fusión (**figura 6**).

Ensayos de lixiviación en columna

Los experimentos en columna se han realizado con una columna formada por un cilindro de metacrilato de 750 mm de longitud, con un diámetro exterior de 150 mm y que cumple con las relaciones dimensionales habituales. Sus características principales aparecen en Navarro y Martínez (2008a). Todo el dispositivo se encuentra montado sobre una estructura metálica que permite regular tanto la altura sobre la superficie como la verticalidad de la columna. La entrada del fluido a la columna se realiza mediante un simulador de lluvia conectado a una bomba dosificadora que proporcionó un caudal aproximado de 1,8 l/hora, durante los ensayos.

Los lixiviados se han analizado mediante ICP-MS, con el fin de determinar los siguientes elementos: Li, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, Hg, Pb, así como los aniones mayoritarios mediante las técnicas habituales. Dichas determinaciones se han contrastado con la muestra de referencia NIST 1640 y se han realizado en Actlabs (Ontario, Canadá).

RESULTADOS OBTENIDOS

Geoquímica de suelos y residuos

En el caso de Sierra Almagrera (depósito de residuos del Arteal), la composición química de los residuos mineros, y los suelos y sedimentos circundantes, se caracteriza por la presencia de cantidades elevadas de Ag, As, Ba, Cu, Fe, Pb, Sb y Zn, y que superan los valores máximos establecidos en algunas legislaciones como la holandesa (**tabla 1**), y también los valores medios del suelo “no contaminado” en esta zona.

Por otro lado, las determinaciones mineralógicas indican la presencia, en los lodos de flotación, de galena, barita y cuarzo

Tabla 3 Composición de los estériles usados en los ensayos

Elemento	Muestra Arteal	Muestra Jaravías
Ag (ppm)	24,7	10,4
As (ppm)	341	62,8
Ba (ppm)	93.000	25.000
Cd (ppm)	11,3	4,6
Cr (ppm)	62	20
Fe (%)	11,8	20,0
Hg (ppm)	<1	<1
Mn (ppm)	2.140	16.200
Mo (ppm)	1	5
Ni (ppm)	48	14
Pb (ppm)	4.380	1.830
Sr (ppm)	4.370	7.560
Sb (ppm)	176	44,5
Cu (ppm)	136	22
Zn (ppm)	2.590	1.660

Figura 7

vista del residuo del Arteal tras el tratamiento térmico

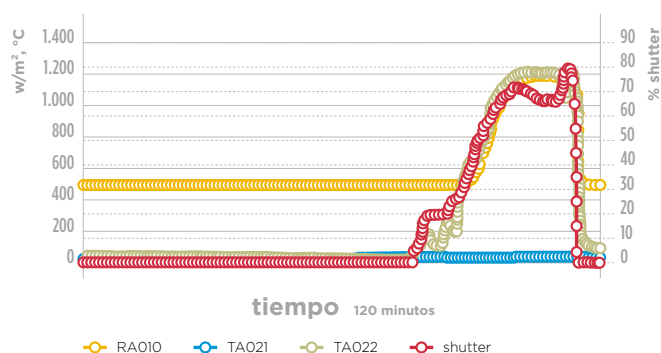
**Figura 8**

vista del residuo de Jaravías tras el tratamiento térmico

**Figura 9**

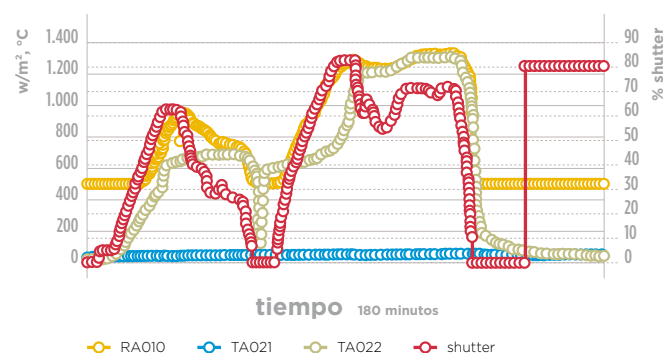
ensayo con lodos del Arteal

TA022: temperatura del material

**Figura 10**

ensayo con lodos de Jaravías

TA022: temperatura del material



como fases dominantes (tabla 2). En el caso de Sierra Almagrera también se generaron grandes cantidades de escorias de fundición que están mayoritariamente situadas en la zona costera de la sierra (Navarro et ál., 2008a).

En el caso de Jaravías, la composición geoquímica de los lodos de flotación indica la existencia de una zona altamente contaminada con contenidos en Ba que llegan hasta un 3,0%, así como contenidos medios importantes de Ag (15,8 ppm), As (302,2 ppm), Cr (28,5 ppm), Pb (1.830 ppm), Sb (69,1) y Zn (1.557,5 ppm) (Navarro y Martínez, 2008b). En cuanto a la mineralogía de los

lodos de flotación de Jaravías, se detectan de forma mayoritaria los siguientes: siderita, yeso, celestina, baritina, dolomita, pirita, galena y minerales de la arcilla. Por último, la composición de los lodos usados en los ensayos de vitrificación aparece en la tabla 3, donde puede verse que se trata de materiales cuya composición geoquímica es muy similar a los contenidos medios detectados en los dos tipos de residuos mineros.

Vitrificación

Los ensayos realizados muestran resultados bastante diferentes en las muestras, a causa de la diferencia entre las temperaturas

Tabla 4 Resultados de los ensayos de lixiviación g/l

MUESTRA	As	Ba	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
L-ALM	<5	80	23,4	31,1	860	8.600	29,6	298,8	<1	902,2
L-JAR	<30	30	<2	23	8.190	1.850	<5	310	<10	285
V-ALM	>200	45	27,9	16,4	540	8.180	9,2	>200	21,1	>250
V-JAR	159	61	0,26	5,9	520	351	0,9	22,1	3,0	41,2

L-ALM: muestra de lodo del Arteal sin tratar; L-JAR: muestra de lodo de Jaravías sin tratar
V-ALM: muestra de lodo del Arteal tratado; V-JAR: muestra de lodo de Jaravías tratado

Resulta interesante señalar la similar concentración de As en las muestras de residuos y de material tratado, lo que indicaría que no se ha volatilizado.

alcanzadas y la duración de las experiencias. Así, en el caso del residuo del Arteal no se alcanza un verdadero vitrificado (**figura 7**), mientras que en el caso del lodo de Jaravías se obtiene un material que recuerda a la escoria de fundición, posiblemente por la cantidad de Fe presente (**figura 8**).

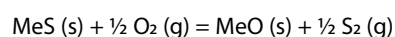
Además, en el ensayo con el residuo del Arteal la temperatura alcanzada (TA022 en **figura 9**) únicamente llega a los 1.200 °C al final de la experiencia (12:33 h), permaneciendo durante buena parte de ella por debajo de 1.200 °C y sufriendo algunas variaciones debido a las condiciones meteorológicas (**figura 9**).

Por el contrario, en el caso del ensayo con el lodo minero de Jaravías, se alcanzan los 1.300 °C, sobrepasándose los 1.200 °C durante más de una hora de ensayo (**figura 10**).

En relación con los resultados de los ensayos de lixiviación, puede observarse en ambos casos la movilización del As, el cual aparecía en concentraciones inferiores a 30 µg/l en los lixiviados de los residuos sin tratar, mientras que alcanza concentraciones de 200 µg/l y 159 µg/l en los lixiviados de las muestras tratadas del Arteal y Jaravías, respectivamente (**tabla 4**).

Para los demás elementos se detecta un comportamiento muy distinto, según la muestra vitrificada. Así, en el caso del residuo del Arteal, cuyo tratamiento se realizó a menor temperatura (**figura 9**), únicamente disminuye claramente la movilidad del Ba, Cu, Fe y Ni, incrementándose la del Pb y Sb, mientras que Cd y Mn presentan concentraciones parecidas en los lixiviados de las muestras tratadas y sin tratar. La razón debe estribar en la baja temperatura alcanzada en el tratamiento térmico, habiéndose producido un material calcinado o “tostado”, más que un

material vitrificado (**figura 7**). Así, en un proceso de tostación, la reacción general que afecta a los sulfuros es la siguiente:



En el caso del Pb y del Sb podrían generarse óxidos más o menos solubles, que explicarían la movilización de estas sustancias, así como en el caso del Zn, aunque los datos analíticos no son concluyentes al respecto.

Por el contrario, en el caso del residuo minero de Jaravías, cuyo tratamiento térmico a mayor temperatura produjo un material escoriáceo (**figura 8**), la movilidad de los principales contaminantes se reduce sensiblemente, salvo en el caso del As y Ba (**tabla 4**). En ese sentido destacan los resultados obtenidos para el Fe, Mn, Pb y Zn, pasando los lixiviados del residuo sin tratar de concentraciones de 8.190, 1.850, 310 y 285 µg/l respectivamente, a concentraciones de 520, 351, 22,1 y 41,2 µg/l respectivamente, en la muestra tratada. En relación con el Cd, Cu, Ni y Sb se consiguen también reducciones apreciables (**tabla 4**).

En cuanto a la movilización del As, su causa debe estar en la forma de presentarse el metaloide en los residuos, probablemente entrando a formar parte de la piritas arsenical, común en todas las mineralizaciones explotadas. En ese sentido, resulta interesante señalar la similar concentración de As en las muestras de residuos y de material tratado, lo que indicaría que el As no se ha volatilizado, en contra de lo que cabría esperar. Así, en la tostación de piritas arsenicales mediante el empleo de hornos de “turbulencia” o de lecho fluidizado, el As queda íntegramente en las cenizas (Pineda, 1963), tal y como parece suceder en las experiencias realizadas. ®

CONCLUSIONES

La actividad minera en el área de Sierra Almagrera (Cuevas del Almanzora, Almería), centrada en la explotación de mineralizaciones filonianas de plomo y plata, ha sido muy dilatada a lo largo de la historia, encontrándose entre

las más antiguas de la Península Ibérica y alcanzando una importancia considerable no sólo a nivel nacional, sino también a nivel mundial, durante buena parte del siglo XIX. Como cualquier explotación minera, una de sus consecuencias más importantes, desde el punto de vista ambiental, ha sido la generación de residuos en forma de

escombreras, escorias de fundición y más recientemente los llamados lodos o fangos de flotación, originados en la concentración de los minerales mediante el citado proceso de la flotación. Todo ello ha producido una importante contaminación por metales (Ag, As, Ba, Cu, Pb, Sb y Zn) en los suelos agrícolas de la zona del Arteal (Cuevas del Almanzora) y Jaravías (Pulpí) y en los sedimentos fluviales de la rambla de Canalejas (afluente del río Almanzora).

Los ensayos de vitrificación realizados muestran resultados bastante diferentes en las muestras, a causa de la diferencia entre las temperaturas alcanzadas y la duración de las experiencias. Así, en el caso del residuo del Arteal no se alcanza un verdadero vitrificado, mientras que en el caso del lodo de Jaravías se obtiene un material que recuerda a la escoria de fundición, posiblemente por la cantidad de Fe presente.

En relación con los resultados de los ensayos de lixiviación, puede observarse en ambos casos la movilización del As, el cual aparecía en concentraciones inferiores a 30 g/l en los lixiviados de los residuos sin tratar. Para los demás elementos se detecta un comportamiento muy distinto, según la muestra vitrificada. Así, en el caso del residuo del Arteal, disminuye claramente la movilidad del Ba, Cu, Fe y Ni, incrementándose la del Pb y Sb, mientras que Cd y Mn presentan concentraciones parecidas en los lixiviados de las muestras tratadas y sin tratar.

Por el contrario, en el caso del residuo minero de Jaravías, con un tratamiento térmico a mayor temperatura, la movilidad de los principales contaminantes se reduce sensiblemente, salvo en el caso del As y Ba. En ese sentido destacan los resultados obtenidos para el Fe, Mn, Pb y Zn, pasando los lixiviados del residuo sin tratar de concentraciones de 8.190, 1.850, 310 y 285 g/l respectivamente, a concentraciones de 520, 351, 22,1 y 41,2 g/l respectivamente, en la muestra tratada. En relación con el Cd, Cu, Ni y Sb se consiguen también reducciones apreciables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bhandari, A.; Surampalli, R.Y.; Champagne, P.; Ong, S.K.; Tyagi, R.D.; Lo, I.M.C. "Remediation Technologies for Soils and Groundwater" ASCE, Reston, Virginia (2007).
2. Camprubí, A.; Albinson, T. "Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica" *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (2007) Vol. LVIII (1), pp 27-81.
3. Çoru, S.; Ergun, N. "Leaching characteristics of Cu flotation waste before and after vitrification" *Journal of Environmental* (2006) Management 81: pp 333-338.
4. Karamanov, A.; Aloisi, M.; Pelino, M. "Vitrification of copper flotation waste" *Journal of Hazardous Materials* (2007) 140, pp 333-339.
5. LaGrega, M.D.; Buckingham, P.L.; Evans, J.C. "Hazardous Waste Management" 2ª edición, New York, McGraw-Hill (2001).
6. Martínez Frías, J. "Sulphide and sulphosalt Mineralogy and Paragenesis from the Sierra Almagrera Veins, Betic Cordillera (SE Spain)" *Estud. geol.* (1991) Vol. 47, pp 271-279.
7. Navarro, A.; Viladevall, M.; Font, X.; Rodríguez, P. "Las mineralizaciones auríferas de Sierra Almagrera (Almería). Estudio geoquímico y modelos de yacimientos" *Boletín Geológico y Minero* (1994) Vol. 105-1, pp 85-101.
8. Navarro, A.; Collado, D.; Sánchez, J.A. "Caracterización de la contaminación producida por actividades mineras en los suelos de la cuenca baja del río Almanzora" *Boletín Geológico y Minero* (1998) Vol. 109 (2), pp 69-87.
9. Navarro, A.; Collado, D.; Carbonell, M.; Sánchez, J.A. "Impact of Mining Activities in a semi-arid environment: Sierra Almagrera district, SE Spain" *Environmental Geochemistry and Health* (2004). 26, pp 383-393.
10. Navarro, A.; Cardellach, E.; Mendoza, J.L.; Corbella, M.; Domènech L.M. "Metal mobilization from base-metal smelting slag dumps in Sierra Almagrera (Almería, Spain)" *Applied Geochemistry* (2008a) 23, pp 895-913.
11. Navarro, A.; Cardellach, E.; Corbella, M. "Mercury mobility in mine waste from Hg-mining areas in Almería, Andalusia (SE Spain)" *Journal of Geochemical Exploration* (2008b) Doi: 10.1016/j.gexplo.2008.08.004.
12. Navarro, A.; Martínez, F. "Effects of sewage sludge application on heavy metal leaching from mine tailings impoundments" *Bioresource Technology* (2008a) 99, pp 7521-7530.
13. Navarro, A.; Martínez, F. "Evaluación del empleo de lodos de depuradora como barrera geoquímica en la remediación de suelos mineros" *Tecnoambiente* (2008b) n.º 185, año XVIII, pp 21-26.
14. Pinedo, I. "Piritas de Huelva: su Historia, Minería y aprovechamiento" Ed. Summa S.L., Madrid, 1003 pp (1963).
15. Ojovan, M.I.; Ojovan, N.V.; Startceva, I.V.; Tchikova, G.N.; Golubeva, Z.I.; Barinov, A.S. "Waste glass behavior in a loamy soil of a wet repository site" *Journal of Nuclear Materials* (2001) 298: pp 174-179.
16. Sellers, K. "Fundamentals of Hazardous Waste Site remediation" Lewis Publ., Boca Raton, 326 pp (1998).
17. USEPA. "Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and radioactive Waste" EPA/625/R-92/002 (1992).
18. USEPA. "Experience in Incineration Applicable to Superfund Site Remediation" EPA/625/9-88/008 (1988).

Agradecimientos

Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia con referencia ENE2006-13267-C05-03, titulado "Desarrollo de un sistema piloto de desorción térmica de suelos contaminados con mercurio".